



УДК 62-681

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОГНЕВОГО ЛИСТА КОТЛА УТИЛИЗАТОРА

## CONSTRUCTION OPTIMIZATION OF FIRE SHEET OF EXHAUST BOILERS

**Абдуллин Ринат Разифович**, аспирант каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: abc@def.com, Тел.: +7(963)443-15-26

**Филипповский Николай Федорович**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: abc@def.com. Тел.: +7(999)765-43-21

**Rinat R. Abdullin**, Master student, Department «Heat power engineering and thermotechnics», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: abc@def.com. Ph.: +7(963)443-15-26

**Nikolay F. Filippovsky**, Doctor Sc., Prof., Department «Heat power engineering and thermotechnics», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: abc@def.com. Ph.: +7(999)765-43-21

**Аннотация:** В работе представлены результаты натурного эксперимента и численных расчетов по оценке влияния качества сварного соединения на температурный режим огневого листа, используемого в качестве поверхностей нагрева в котлах утилизаторах. Разработанная и верифицированная по результатам эксперимента модель позволяет рассчитать температурное поле при любых размерах и сочетаниях материалов элементов конструкции. Проведено сравнение полученных максимальных температур в огневом листе и в экранах из стандартных плавниковых труб при аналогичных граничных условиях.

**Abstract:** The work presents results of experiment and numerical simulations of a weld quality influence on fire sheet temperature regime, which used as a heating surface in exhaust boilers. The model designed and verified by the results of experiments allows to calculate the temperature field of fire sheet of any sizes and combinations of construction elements materials. A comparison of the maximum temperature in the firing sheet and heating surfaces of standard fin tubes under similar boundary conditions presented.

**Ключевые слова:** огневой лист; котел утилизатор; плавниковые трубы; сварной шов.

**Key words:** fire sheet; exhaust boiler; fin tube; weld bead.

### ВВЕДЕНИЕ

В ОАО «Уралэнергоцветмет» разработана конструкция котла-утилизатора для утилизации теплоты отходящих газов за печами Ванюкова. Отходящие газы имеют температуру около 1300°C и высокую запыленность расплавленными частицами, кроме того, в них содержится значительное количество оксидов серы. В состав газа входят 40% SO<sub>2</sub>, 5% O<sub>2</sub>. Стены котла-утилизатора изготавливаются из гладких стальных листов, к которым снаружи приварены трубы испарительного контура (рис.1). Данная конструкция облегчает очистку теплообменных поверхностей от загрязнений, надёжно защищает трубы от сернокислотной коррозии в период пуска и останова котла.

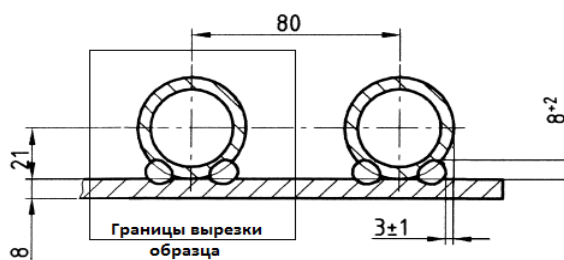


Рис.1. Проектная конструкция огневого листа.

Данная конструкция имеет следующие особенности:

- весь тепловой поток передается через сварные швы, поэтому качество их выполнения определяет температурный режим огневого листа;
- максимальная температура листа между трубами, очевидно, не должна превышать допустимой рабочей температуры материала листа.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Существующие аналитические методы расчета температурного поля огневого листа [1,2], кроме ряда упрощений геометрии и граничных условий, никак не учитывают качество выполнения сварного шва. Поэтому оценка влияния качества сварного шва проводилась опытным путем. Для этого из котла утилизатора были вырезаны три участка огневого листа (лучшими и худшими швами по визуальной оценке), и еще два образца с хорошими сварными швами были изготовлены для сравнения. Тепловой поток на образцах, эквивалентный потоку в котле утилизаторе, создавался в экспериментальной установке за счет теплопередачи от циркулирующей горячей воды ( $80-85^{\circ}\text{C}$ ) со стороны листа к холодной воде ( $11-15^{\circ}\text{C}$ ) в трубе. Чтобы достичь необходимой величины теплового потока, значительно меньшая разница температур  $70^{\circ}\text{C}$ , чем в котле  $1050^{\circ}\text{C}$ , компенсировалась большими коэффициентами теплоотдачи. Для этого в трубу был вставлен шнек, а к пластине приварена коробка с перегородками, организующими многоходовое течение воды (рис. 2).



Рис.2. Фотографии элементов конструкции экспериментальной установки.

В результате площадь поперечного сечения канала в трубе и на пластине уменьшилась, а скорость воды и, следовательно, коэффициенты теплоотдачи увеличились. Мощность теплового потока замеряли по тепловому балансу со стороны холодной воды, где потери тепла в окружающую среду были минимальны. По результатам экспериментов выяснилось, что качество выполнения сварного шва значительно влияет на тепловую эффективность огневого листа – термическое сопротивление образцов с хорошим и плохим швами отличалось более чем в полтора

раза ( $1,0$  и  $1,6$  ( $\text{м}^2\cdot\text{K}$ )/ $\text{кВт}$ ). Более детально экспериментальная часть описана в [3].

Для того, чтобы оценить, как изменение термического сопротивления повлияет на максимальную температуру огневого листа, необходимо создать не только тепловой поток, но и температуры эквивалентные рабочим условиям котла утилизатора. В лабораторных условиях такие условия создать достаточно сложно, поэтому следующим этапом исследования стало компьютерное моделирование.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование проводилось посредством пакета программ COMSOL Multiphysics. Геометрия, свойства материалов и условия теплопередачи задавались в соответствии с образцами и условиями лабораторных экспериментов. Результаты численного эксперимента на модели сравнивали с результатами лабораторного эксперимента по величине теплового потока. Так же сравнивалось распределение температуры по поверхности модели со снимками, полученными в эксперименте с помощью тепловизора. Результаты численного и лабораторного эксперимента совпали не сразу, так как геометрия внутренней части сварных швов трудно поддается замерам и в первых попытках была не точно передана модели. Также в процессе верификации установлено, что коэффициент теплоотдачи внутри трубы  $\alpha_{\text{вн}}$  значительно ниже, чем полагалось по предварительному расчету из-за наличия окалины – графики распределения температур по поверхности в модели и в эксперименте совпали при значении  $\alpha_{\text{вн}} = 5 \text{ кВт/м}^2\text{K}$  (расчетное значение по условиям течения воды получалось порядка  $20 \text{ кВт/м}^2\text{K}$ ). Шлифовка внутренней поверхности трубы показала, что слой окалины на новых трубах действительно есть, причем, толщина ее неравномерна по периметру (в среднем около  $0,2 \text{ мм}$ ). После такой подстройки модели, результаты численных экспериментов совпали с лабораторными.

Далее расчеты проводились в соответствии с условиями работы огневого листа в котле. Результаты моделирования показали, что максимальная температура огневого листа с качественным сварным швом и температурой кипящей воды внутри трубы  $260^{\circ}\text{C}$  будет порядка  $300^{\circ}\text{C}$ , с некачественным швом -  $330^{\circ}\text{C}$ . Это значительно ниже максимально допустимой рабочей температуры стали листа 12X1МФ ( $540-580^{\circ}\text{C}$ ), поэтому даже огневой лист с некачественно выполненными сварными швами выстоит в условиях работы котла утилизатора. Причина тому – наличие слоя загрязнений на поверхности огневого листа, которые имеют

низкий коэффициент теплопроводности и предохраняют огневой лист от перегрева. Для работы в таких условиях конструкция огневого листа имеет даже избыточный запас по теплопередаче и ее можно было бы удешевить, используя меньшую толщину металла или более дешевые марки сталей с меньшей рабочей температурой.

### ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ

Для оптимизации конструкции, посредством численного эксперимента на существующей модели, оценили влияние изменения толщины пластины и стенок трубы на тепловую эффективность и максимальную температуру огневого листа. Результаты моделирования показали, что уменьшение толщины стенок трубы даже улучшит тепловую эффективность и снизит максимальную температуру огневого листа. Уменьшение толщины пластины ухудшит тепловую эффективность, но при существующем избыточном запасе конструкции, тоже может применяться для уменьшения металлоемкости и снижения стоимости конструкции.

Но такие попытки оптимизации конструкции не приведут к значительному повышению эффективности работы котла, так как коэффициент теплопередачи от газов к охлаждающей воде в большей степени определяется загрязнениями на экранной поверхности, а не ее конструкцией. В зарубежных конструкциях применяют интенсивную очистку поверхности за счет ударного встряхивания. Это позволит снизить стоимость конструкции за счет уменьшения необходимой площади теплообмена, но расчеты показали, что используемая конструкция не сможет работать в условиях такой тепловой нагрузки из-за локального перегрева материала выше  $800^{\circ}\text{C}$ . С целью поиска более подходящей конструкции выполнено моделирование температурного поля экранной поверхности, сваренной из стандартных плавниковых труб.

Для моделирования использовались характеристики труб согласно ТУ 14-3-341-75 "Трубы стальные бесшовные плавниковые" с наружным диаметром 50 мм и толщиной стенки 6 мм. При самых неблагоприятных условиях работы: коэффициенте теплоотдачи со стороны воды  $5 \text{ кВт/м}^2\text{K}$  (при наличии окалины) и со стороны газов  $400 \text{ Вт/м}^2\text{K}$  (чистая поверхность) максимальная температура на конце плавника трубы составила  $507^{\circ}\text{C}$ . Это ниже максимально допустимой температуры  $540-580^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура в огневом листе старой конструкции в таких же условиях достигала  $821^{\circ}\text{C}$ . При этом удельный тепловой поток в плавниковых трубах получился примерно в 2 раза выше, чем в огневом

листе старой конструкции:  $521 \text{ кВт/м}^2$  против  $258 \text{ кВт/м}^2$ .

Также к достоинствам экранов из плавниковых труб по сравнению с огневым листом старой конструкции можно отнести:

- меньший объем сварки;
- меньшие требования к качеству сварки, поскольку эффективность теплопередачи, а соответственно и максимальная температура материала не зависят от качества сварного соединения между трубами;
- меньшая металлоемкость.

### ВЫВОД

Исследование влияния конструкции огневого листа на эффективность теплопередачи в котле утилизаторе отходящих газов за печами Ванюкова показало, что наличие большого количества загрязнений на поверхностях нагрева, характерное для рабочих условий, значительно снижает тепловую нагрузку на материал огневого листа и позволяет удешевить его конструкцию за счет использования более дешевых марок стали, уменьшения толщины металла и отказа от удаления окалины с внутренней поверхности труб. Но гораздо большего повышения эффективности можно добиться, применяя эффективную систему очистки поверхностей нагрева. Существующая конструкция огневого листа не подходит для работы с чистыми поверхностями и приведет к локальным перегревам материала выше допустимой температуры. Более подходящая конструкция из плавниковых труб способна работать в условиях чистых поверхностей нагрева, позволяет примерно вдвое увеличить удельный тепловой поток, имеет более низкую металлоемкость и стоимость производства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баскаков А.П., Ильина Е.В. Распределение температур по ширине огневого листа (экрана) с приваренными снаружи трубами. // Промышленная энергетика. 2002. № 3. С. 41-44.
2. Степин С.М., Мунц В.А.. Методика расчета температурного поля огневого листа котлов-утилизаторов. // Промышленная энергетика. 2007. № 12. С. 27-29.
3. Филипповский Н.Ф., Абдуллин Р.Р., Скисов Г.Н.. "Влияние качества сварного соединения на его теплопроводящие свойства". Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием "Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии". (16-19 декабря 2014 г., Екатеринбург).